

О ФОРМЕ СПЕКТРА ФЛУКТУАЦИЙ ИНТЕНСИВНОСТИ ГАЛАКТИЧЕСКИХ КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧЕЙ

SHAPE OF SPECTRUM OF GALACTIC COSMIC RAY INTENSITY FLUCTUATIONS

С.А. Стародубцев 

*Институт космофизических исследований и аэронауки
им. Ю.Г. Шафера СО РАН,
Якутск, Россия, starodub@ikfia.ysn.ru*

S.A. Starodubtsev

*Yu.G. Shafer Institute of Cosmophysical Research
and Aeronomy SB RAS,
Yakutsk, Russia, starodub@ikfia.ysn.ru*

Аннотация. Воздействие плазмы солнечного ветра на потоки проникающих извне в гелиосферу галактических космических лучей (ГКЛ) с энергиями выше ~ 1 ГэВ приводит к возникновению вариаций интенсивности КЛ в широком диапазоне частот. Поскольку КЛ являются заряженными частицами, их модуляция происходит главным образом под воздействием межпланетного магнитного поля (ММП).

Хорошо известно, что наблюдаемый спектр флуктуаций ММП в широкой области частот $\nu \sim 10^{-7} - 10$ Гц носит ярко выраженный падающий характер и состоит из трех участков — энергетического, инерционного и диссипативного. Каждый описывается степенным законом $P_{\text{ММП}}(\nu) \sim \nu^{-\alpha}$, причем показатель α спектра ММП увеличивается с ростом частоты. При этом на каждом участке флуктуации ММП характеризуются свойствами, зависящими от их природы.

Известна также установленная связь между спектрами флуктуаций ММП и ГКЛ в случае модуляции последних альфвеновскими или быстрыми магнитозвуковыми волнами. Теория предсказывает, что спектры флуктуаций КЛ должны описываться также степенным законом $P_{\text{КЛ}}(\nu) \sim \nu^{-\gamma}$. Однако результаты многолетних работ сотрудников ИКФИА СО РАН по изучению природы и свойств флуктуаций интенсивности КЛ с использованием данных регистрации нейтронных мониторов на станциях с различными порогами геомагнитного обрезания $R_C \sim 0.5 - 6.3$ ГВ показывают, что наблюдаемый спектр флуктуаций интенсивности ГКЛ при $\nu > 10^{-4}$ Гц становится плоским, т. е. он подобен белому шуму. Этот факт требует своего понимания и объяснения.

В данной работе на основе данных измерений нейтронного монитора станции Апатиты приводятся результаты изучения формы спектра флуктуаций интенсивности ГКЛ в области частот $\nu \sim 10^{-6} - 1$ Гц и их сопоставления с модельными расчетами спектров белого шума. Дано возможное физическое объяснение наблюдаемой формы спектра флуктуаций КЛ на основе известных механизмов их модуляции в гелиосфере.

Ключевые слова: нейтронный монитор, космические лучи, межпланетное магнитное поле, модуляция, спектр мощности, белый шум.

Abstract. The impact of solar wind plasma on fluxes of galactic cosmic rays (CR) penetrating from the outside into the heliosphere with energies above ~ 1 GeV leads to temporal variations in the CR intensity in a wide frequency range. Cosmic rays being charged particles, their modulation occurs mainly under impacts of the interplanetary magnetic field.

It is well known that the observed spectrum of interplanetary magnetic field (IMF) fluctuations in a wide frequency range ν from $\sim 10^{-7}$ to ~ 10 Hz has a pronounced falling character and consists of three sections: energy, inertial, and dissipative. Each of them is described by the power law $P_{\text{IMF}}(\nu) \sim \nu^{-\alpha}$, while the IMF spectrum index α increases with increasing frequency. The IMF fluctuations in each of these sections are also characterized by properties that depend on their nature.

Also known are established links between fluctuation spectra of the interplanetary magnetic field and galactic cosmic rays in the case of modulation of the latter by Alfvén or fast magnetosonic waves. The theory predicts that fluctuation spectra of cosmic rays should also be described by the power law $P_{\text{CR}}(\nu) \sim \nu^{-\gamma}$. However, the results of many years of SHICRA SB RAS research into the nature and properties of cosmic ray intensity fluctuations based on data from neutron monitors at stations with different geomagnetic cut-offs R_C from 0.5 to 6.3 GV show that the observed spectrum of fluctuations in galactic cosmic ray intensity in the frequency range above 10^{-4} Hz becomes flat, i.e. it is similar to white noise. This fact needs to be realized and explained.

This paper reports the results of research into the shape of the spectrum of galactic cosmic ray intensity fluctuations within a frequency range ν from $\sim 10^{-6}$ to ~ 1 Hz and compares them with model calculations of white noise spectra, using measurement data from the neutron monitor of the Apatity station. A possible physical explanation has been given for the observed shape of the cosmic ray fluctuation spectrum on the basis of the known mechanisms of their modulation in the heliosphere.

Keywords: neutron monitor, cosmic rays, interplanetary magnetic field, modulation, power spectrum, white noise.

ВВЕДЕНИЕ

Как известно, из межзвездной среды в гелиосферу постоянно поступает диффузионный поток галактических космических лучей (ГКЛ). При распространении в гелиосфере КЛ подвержены значительному модулирующему воздействию солнечного ветра (СВ). По мере приближения к Солнцу, возникает радиальный градиент КЛ, их интенсивность падает и в зависимости от уровня солнечной активности наблюдаются значительные временные вариации ее амплитуды, происходящие на больших временных масштабах — от минут до одиннадцати лет и более. Поскольку ГКЛ являются заряженными частицами и представляют собой элементарные частицы (в основном протоны) и ядра химических элементов вплоть до железа, основным модулирующим фактором КЛ является межпланетное магнитное поле (ММП).

Многолетние измерения параметров СВ на космических аппаратах показывают, что в зависимости от уровня солнечной активности изменения подвержено не только само крупномасштабное ММП, но и его турбулентная составляющая. При этом соответствующий ей наблюдаемый спектр флуктуаций ММП занимает достаточно широкую область частот от 10^{-7} до 1 Гц и выше, а их мощность меняется, как минимум, на 11 порядков величины от 10^{-4} до 10^7 нТл²/Гц [Russell, 1972; Коваленко, 1983]. При этом спектр флуктуаций ММП имеет падающий вид и описывается степенной функцией вида $P_{\text{ММП}}(\nu) = P_0 \nu^{-\alpha}$, где $P_{\text{ММП}}(\nu)$ — мощность флуктуаций ММП на частоте ν ; P_0 — постоянная спектра; α — показатель степени. Весь наблюдаемый спектр флуктуаций ММП можно разделить на три участка, в которых составляющие его колебания и волны имеют разные свойства. Эти участки называются энергетическим, инерционным и диссипативным. Их характерной чертой является тот факт, что на их границах, на частотах $\sim 10^{-4}$ и ~ 0.1 Гц соответственно спектр претерпевает излом и с повышением частоты становится более крутым.

Поскольку спектр флуктуаций интенсивности ГКЛ с энергией более 1 ГэВ оказывается связанным со спектром ММП [Owens, 1974; Бережко, Стародубцев, 1988], казалось бы, его форма должна отражать форму спектра флуктуаций ММП. Однако многочисленные наблюдения спектра флуктуаций интенсивности КЛ по данным нейтронных мониторов мировой сети станций, имеющих разные пороги геомагнитного обрезания и разные высоты над уровнем моря, в различные относительно состояния межпланетной среды и геомагнитного поля периоды показывают, что это далеко не так. В спокойные периоды в области частот выше $\sim 10^{-4}$ Гц спектр флуктуаций интенсивности КЛ, как правило, имеет плоский вид, характерный для спектра белого шума. Впервые на это обстоятельство указано в работе [Крымский и др., 1973]. Этот факт требует своего понимания и объяснения, что и является целью этой статьи.

1. ДАННЫЕ И МЕТОДЫ

В работе использовались данные измерений модуля поля на космических аппаратах WIND с разным

шагом дискретизации $\Delta t = 1$ ч, 1 мин и 3 с, а также ACE с $\Delta t = 1$ с. Данные измерений параметров межпланетной среды находятся в свободном доступе на [https://cdaweb.gsfc.nasa.gov/cdaweb/sp_phys] для WIND и на [http://www.srl.caltech.edu/ACE/ASC/level2/lv12DATA_MAG.html] для ACE.

Для определения спектров флуктуаций интенсивности ГКЛ использовались исправленные за барометрический эффект данные ($\Delta t = 1$ сут, 1 ч и 1 мин) регистрации нейтронного монитора 9-NM-64 станции КЛ Оулу [https://cosmicrays oulu.fi], а также данные ($\Delta t = 1$ ч, 5 мин и 1 мин, 10 с и 1 с) нейтронного монитора 18-NM-64 станции Апатиты [http://pgia.ru/cosmicray].

Несмотря на то, что распределение скоростей счета частиц КЛ в единицу времени описывается законом Пуассона, для модельных расчетов использовался генератор случайных чисел, имеющих гауссовское (нормальное) распределение. Это обусловлено тем известным обстоятельством, что распределение Пуассона очень быстро переходит в хорошо известное распределение Гаусса [Тейлор, 1985]. При моделировании интенсивности гауссовского шума использована приведенная в [Отнес, Эноксон, 1982] подпрограмма на языке FORTRAN генератора равномерно распределенных случайных чисел, которая практически не позволяет вернуться в исходное состояние. Это важное обстоятельство позволяет избежать вполне возможных парных и тройных корреляций псевдослучайных чисел. Для контроля работы генератора гауссовского шума и количественного описания его характеристик (плотности распределения и статистики χ^2_0) были специально созданы программы, основанные на алгоритмах, приведенных также в [Отнес, Эноксон, 1982].

При расчете спектров мощности флуктуаций интенсивности КЛ, МПП и белого шума применялся стандартный метод Блэкмена—Тьюки с корреляционным окном Тьюки, алгоритм которого представлен там же. При построении доверительных интервалов при оценке мощности флуктуаций различных величин учитывалось, что число степеней свободы DoF (degrees of freedom) с использованием корреляционного окна Тьюки $DoF = 2.667n$, где n — коэффициент обрезания ковариационной функции [Дженкинс, Ваттс, 1971].

2. РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

В качестве примера на рис. 1 показаны спектры мощности флуктуаций интенсивности ГКЛ для периода август 2014 – февраль 2015 г. Для их определения использовались данные измерений нейтронного монитора станции Оулу с разным шагом дискретизации $\Delta t = 1$ сут, 1 ч и 1 мин. Видно, что в спектрах присутствуют хорошо известные вариации КЛ с периодами 27 дней и 24 ч. Также видно, что до частот ниже 10^{-4} Гц спектры являются падающими и их можно описать степенным законом $P_{\text{КЛ}}(\nu) \sim \nu^{-\gamma}$ с показателями $\gamma = 2.326 \pm 0.001$ и $\gamma = 0.867 \pm 0.043$ соответственно. Однако на частотах выше 10^{-4} Гц спектр резко меняет свой вид и становится плоским с $\gamma = 0.002 \pm 0.003$. Это характерно для белого шума,

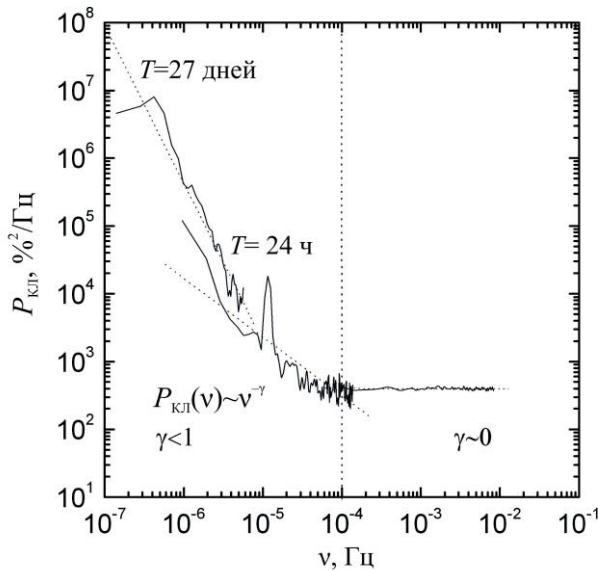


Рис. 1. Спектры флуктуаций интенсивности ГКЛ по данным станции Оулу. Отмечены 27-дневная и суточная вариации интенсивности КЛ. Вертикальным пунктиром показана условная граница между энергетическим и инерционным участками спектра МГД-турбулентности СВ. Прямые пунктирные линии — аппроксимация спектров степенным законом с помощью метода наименьших квадратов

а вид наблюдаемого спектра флуктуаций КЛ в этой области частот явно не соответствует известной форме спектра флуктуаций ММП [Russell, 1972; Коваленко, 1983].

Таким образом, наблюдаемое в многочисленных экспериментах несоответствие формы спектров флуктуаций интенсивности ГКЛ и ММП требует своего понимания и объяснения. Попробуем это сделать на примере анализа данных измерений нейтронного монитора станции Апатиты и измерений модуля ММП на космических аппаратах ACE и WIND 6–19 августа 2019 г., когда межпланетная среда и геомагнитное поле находились в спокойном состоянии. Отметим, что данные станции КЛ Апатиты были выбраны только по той простой причине, что на ней установлена система регистрации, позволяющая получать информацию об интенсивности КЛ с разным шагом дискретизации данных Δt , вплоть до 1 с и даже меньше.

На рис. 2 показан наблюдаемый в это же время спектр мощности флуктуаций модуля ММП. Видно, что в этом случае спектр имеет выраженную падающую форму, которую вполне можно описать степенным законом. Как и ожидается, с ростом частоты спектр флуктуаций ММП становится круче, при этом его показатель α для разных участков изменяется от 1.28 до 1.67. С другой стороны, на рис. 3 показан спектр флуктуаций КЛ определенный по данным измерений на станции Апатиты. На нем так же, как и на рис. 1, хорошо виден пик, соответствующий известной вариации интенсивности ГКЛ периодом $T=24$ ч, а на частотах $\nu > 10^{-4}$ Гц спектр, так же как и на рис. 1, становится плоским с $\gamma \approx 0$.

Необходимо отметить, что, поскольку при расчетах спектров используются длинные ряды данных, на рис. 1–3 не показаны доверительные интервалы в силу их малости.

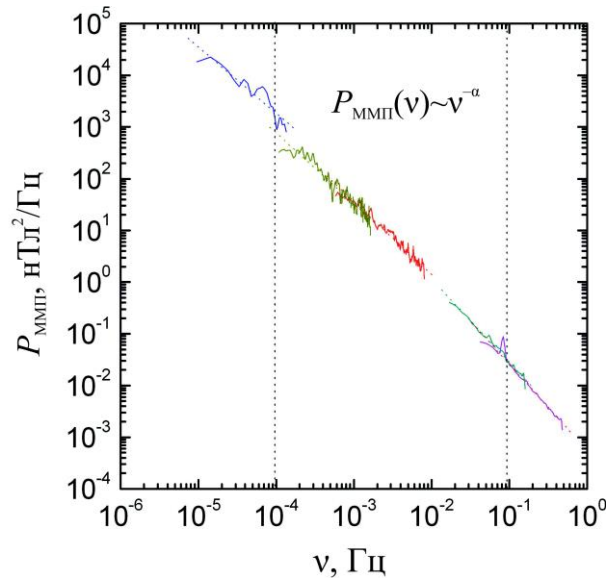


Рис. 2. Спектр флуктуаций модуля ММП по измерениям на космических аппаратах WIND и ACE с разным шагом дискретизации данных (см. текст). Обозначения те же, что и на рис. 1

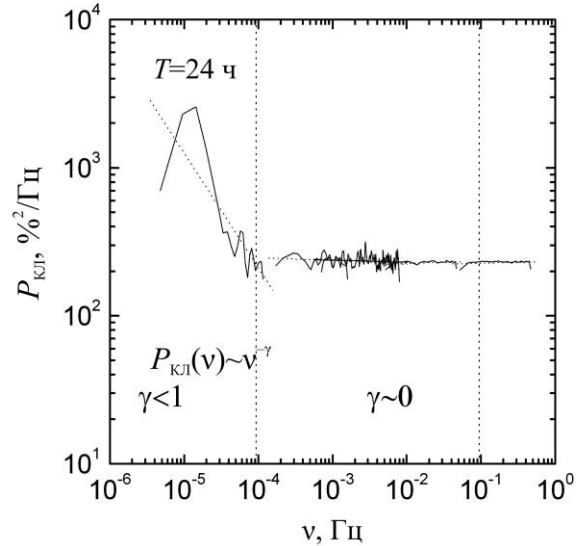


Рис. 3. Спектр флуктуаций интенсивности ГКЛ по данным станции Апатиты. Обозначения те же, что на рис. 1

На рис. 4, *a–e* показано, как изменяется амплитуда флуктуаций интенсивности ГКЛ при регистрации с разным шагом дискретизации Δt для периода 6–19 августа 2019 г. по измерениям нейтронным монитором станции Апатиты. Здесь амплитуда рассчитывалась как отклонение наблюдаемого темпа счета детектора, отнесенное к его среднему значению за весь рассматриваемый период времени. Видно, что с уменьшением Δt амплитуда изменений интенсивности КЛ значительно возрастает. Более детальный анализ данных показывает, что при уменьшении Δt амплитуда возрастает от $A \approx 0.5$ % (рис. 4, *a*, видимая невооруженным глазом вариация интенсивности КЛ с $T=24$ ч) до значений $A \approx 50$ % и выше (рис. 4, *e*), причем, например, для одночасовых данных стандартное отклонение составляет $\sigma = 0.44$ %, для односторонних — 1.44 %, а для односторонних — 10.76 %, т. е. с уменьшением Δt при регистрации данных σ значительно возрастает.

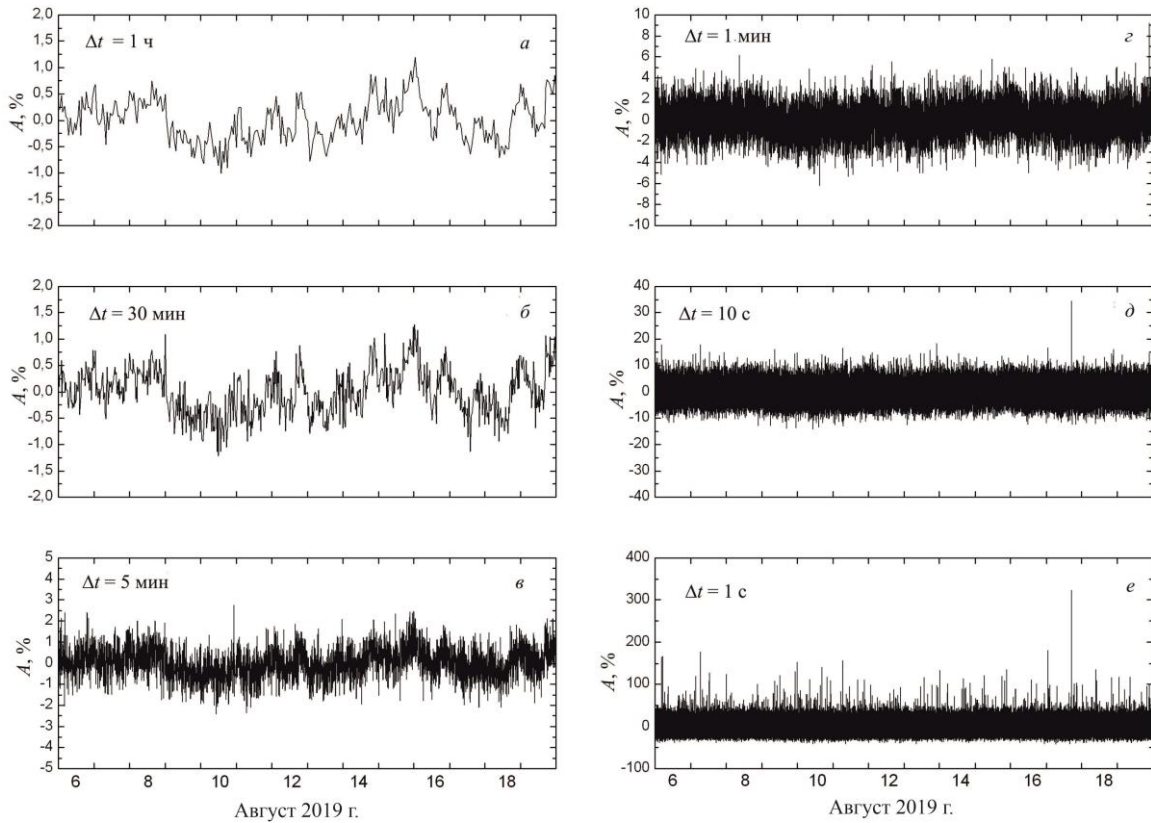


Рис. 4. Интенсивность КЛ с разным шагом дискретизации как функция времени для периода 6–19 августа 2019 г. по измерениям нейтронного монитора станции Апатиты

Заметим, что непосредственно наблюдаемые вариации КЛ при малых Δt замываются шумом и для выделения их высокочастотной части (так называемых флуктуаций КЛ с периодом $T < 2 \div 3$ ч) необходимо использовать методы спектрального анализа (рис. 4, з–е). Обращают на себя внимание также единичные выбросы в виде δ -функции большой амплитуды при регистрации КЛ с $\Delta t = 10$ с и $\Delta t = 1$ с (рис. 4, д, е). По мнению разработчиков системы регистрации данных нейтронного монитора из Полярного геофизического института, выбросы имеют физическое происхождение и обусловлены приходом частиц сверхвысоких энергий, которые в теле монитора образуют множественные звезды. Для изучения этого явления проводятся специальные исследования [Valabin et al., 2011; Балабин и др., 2015].

Чтобы понять, почему спектр флуктуаций КЛ на частотах выше 10^{-4} Гц имеет плоскую форму, был смоделирован соответствующий условиям регистрации гауссовский шум, для которого в случае одночасовых и одноминутных данных $\sigma = 1.41\%$, а односекундных — 11.07% . В качестве примера на рис. 5 показан временной ряд ($N = 20160$ отсчетов, что соответствует интервалу 14 дней; $\Delta t = 1$ мин; $\sigma = 1.41\%$), представляющий смоделированный шум с гауссовским распределением. Этот ряд вполне соответствует характеристикам интенсивности ГКЛ за рассматриваемый период времени (см. рис. 4, з). На рис. 6 показана его плотность распределения ρ относительно σ и ее аппроксимация функцией Гаусса. Для расчета ρ в соответствии с рекомендациями, приведенными в работе [Тейлор, 1985] принималось,

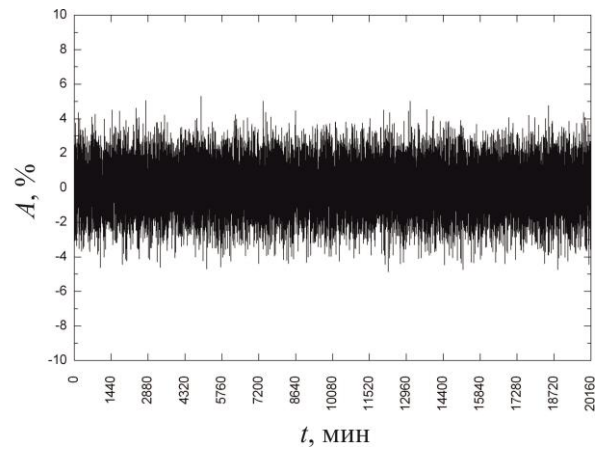


Рис. 5. Временные вариации интенсивности КЛ для смоделированного шума с гауссовским распределением: $N = 20160$, $\Delta t = 1$ мин, $\sigma = 1.41\%$

что число бинов $N_{\text{bin}} = 16$ с шагом $\Delta N_{\text{bin}} = 0.5\sigma$, при этом число степеней свободы $DoF = 13$.

При этом сумма значений плотности распределения составила $\Sigma\rho = 0.9979$ и приведенное $\chi_0^2 = 0.3589$. В итоге сами результаты расчета, показанные на рис. 6, и приведенное значение $\chi_0^2 < 1$ убедительно свидетельствуют о том, что сгенерированный цифровой ряд подчиняется распределению Гаусса.

Таким же образом были сгенерированы модельные ряды с $\Delta t = 1$ ч и $\Delta t = 1$ с.

Соответствующие модельным рядам спектры мощности флуктуаций шума показаны на рис. 7. Видно, что в области частот, охватывающей два порядка,

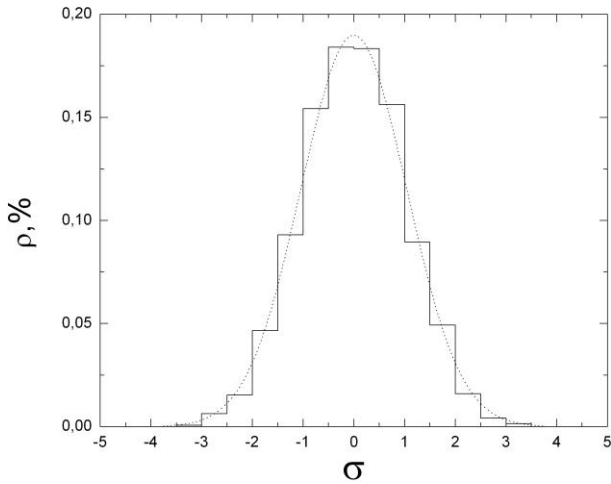


Рис. 6. Плотность распределения ρ модельного шума, показанного на рис. 5, относительно σ и ее аппроксимация функцией Гаусса

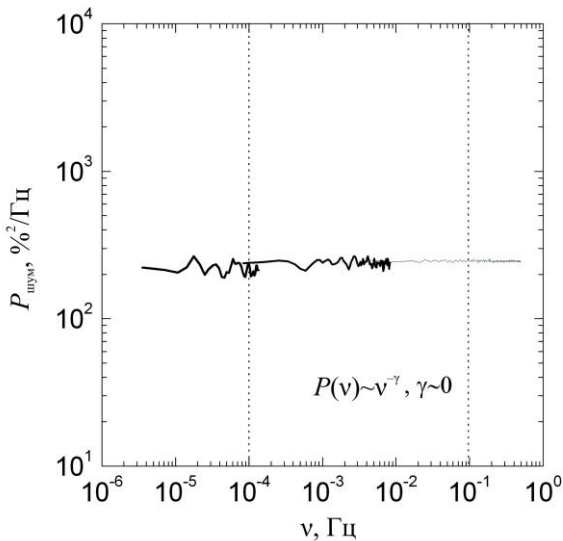


Рис. 7. Спектры флуктуаций гауссовского шума, рассчитанные для модельных данных с Δt 1 ч, 1 мин, 1 с и стандартными отклонениями 0.17, 1.41 и 11.07 % соответственно

форма спектров соответствует форме белого шума, который можно описать степенной функцией с показателем $\gamma \approx 0$.

Сопоставление рис. 3 и 7 показывает, что экспериментальные и модельные значения мощности флуктуаций интенсивности КЛ и шума хорошо совпадают на частотах выше критической $\nu_{\text{крит}} \approx 10^{-4}$ Гц. Следовательно, модель удовлетворительно описывает поведение флуктуаций КЛ на частотах, соответствующих T от 2–3 ч до 2 с. На частотах ниже критической они существенно расходятся. Возникает закономерный вопрос — почему?

Ответ на него может быть следующий. Причиной плоского (шумоподобного) спектра флуктуаций КЛ является изотропизация потока ГКЛ, возникающая при их распространении в гелиосфере вследствие рассеяния на МГД-волнах (альфвеновских и магнитозвуковых) [Owens, 1974; Бережко, Стародубцев, 1988] и замороженных в СВ статических неоднородностях ММП. Казалось бы, весь наблюдаемый спектр флуктуаций КЛ должен иметь такую форму,

однако хорошо известно, что за механизмы возникновения вариаций интенсивности КЛ характерной амплитуды и частоты (или периода) отвечают определенные физические механизмы модуляции КЛ. В частности, за суточную вариацию КЛ ответственен конвективно-диффузионный механизм [Крымский, 1964], за полусуточную — механизм экранировки КЛ секторным ММП [Крымский и др., 1981]. Согласно этим теоретическим работам, при реализации таких физических механизмов значение амплитуды суточной ($T=24$ ч) вариации КЛ составляет около $A \approx 0.5\%$, полусуточной ($T=12$ ч) — $\approx 0.15\%$. Это вполне соответствует средним значениям в данных многолетних наблюдений, а также средней мощности спектра флуктуаций КЛ $P(\nu) \approx 2 \cdot 10^4 \text{ \%}^2/\text{Гц}$ и $P(\nu) \approx 9.7 \cdot 10^3 \text{ \%}^2/\text{Гц}$ на соответствующих им частотах $\nu \approx 1.16 \cdot 10^{-5}$ Гц и $\nu \approx 2.31 \cdot 10^{-5}$ Гц. Возникновение флуктуаций галактических КЛ на частотах, больших $\nu_{\text{крит}} \approx 10^{-4}$ Гц, которая является границей между энергетическим и инерционным участками спектра МГД-турбулентности, объясняется модуляцией КЛ быстрыми магнитозвуковыми волнами. МГД-волны этого типа характеризуются большим декрементом затухания и генерируются локально в окрестности Земли потоками КЛ низких энергий солнечного или межпланетного происхождения [Бережко, Стародубцев, 1988].

Тогда становится понятной не только наблюдаемая форма спектров флуктуаций интенсивности ГКЛ, но и наблюдаемая перед крупномасштабными возмущениями СВ на частотах $\nu_{\text{крит}} > 10^{-4}$ Гц динамика спектра флуктуаций интенсивности КЛ, на основе которой в ИКФИА СО РАН еще в 1982 г. был разработан метод прогноза космической погоды [Козлов и др., 1984].

ВЫВОДЫ

Проведенный анализ приводит к следующим выводам.

1. Причиной плоского шумоподобного спектра флуктуаций КЛ на частотах выше критической $\nu_{\text{крит}} \approx 10^{-4}$ Гц является изотропизация потока ГКЛ, возникающая при их распространении в гелиосфере вследствие рассеяния на МГД-волнах альфвеновского и магнитозвукового типа и замороженных в СВ статических неоднородностях ММП.

2. На частотах ниже $\nu_{\text{крит}} \approx 10^{-4}$ Гц наблюдается падающий спектр мощности флуктуаций ГКЛ. При этом спектр описывается степенной функцией вида $P(\nu) \sim \nu^{-\gamma}$ с $\gamma > 1$.

3. На частотах выше $\nu_{\text{крит}}$ наблюдается плоский, подобный белому шуму спектр.

4. Во время крупномасштабных возмущений СВ на частотах выше $\nu_{\text{крит}} \approx 10^{-4}$ Гц наблюдается рост амплитуды (мощности) флуктуаций КЛ, при этом показатель спектра становится $\gamma < 1$ и соответственно этому спектр флуктуаций галактических КЛ в области частот выше 10^{-4} Гц меняет свою форму и становится возрастающим.

5. Форма спектра флуктуаций КЛ в широкой области частот существенно отличается от вида спектра флуктуаций ММП и обусловлена реализацией в ге-

лиосфере соответствующих физических механизмов модуляции КЛ.

Автор благодарит И.Г. Усошкина и Ю.В. Балабина за предоставление данных измерений нейтронных мониторов станций КЛ Оулу и Апатиты, а также команду эксперимента ACE MAG и ACE Science Center и Space Physics Data Facility (NASA's Goddard Space Flight Center) за свободный доступ к данным космических аппаратов ACE и WIND. Автор признателен Г.Ф. Крымскому за полезные обсуждения. Работа поддержана грантом РФФ №22-22-20045.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Балабин Ю.В., Гвоздецкий Б.Б., Германенко А.В. Большие и малые множественности на нейтронных мониторах: их различия. *Изв. РАН. Сер. физ.* 2015. Т. 79, № 5. С. 708–710. DOI: [10.7868/S0367676515050117](https://doi.org/10.7868/S0367676515050117).

Бережко Е.Г., Стародубцев С.А. Природа динамики спектра флуктуаций космических лучей. *Изв. АН СССР. Сер. физ.* 1988. Т. 52. С. 2361–2363.

Дженкинс Г., Ваттс Д. Спектральный анализ и его приложения. М.: Мир, 1971. Вып. 1. 317 с.

Коваленко В.А. Солнечный ветер. М.: Наука, 1983. 273 с.

Козлов В.И., Борисов Д.З., Туголуков Н.Н. Метод диагностики межпланетных возмущений по исследованию флуктуаций космических лучей и его реализация в системе автоматизации научных исследований на полярной гео-космофизической обсерватории Тикси. *Изв. АН СССР. Сер. физ.* 1984. Т. 48, № 10. С. 2228–2230.

Крымский Г.Ф. Диффузионный механизм суточной вариации космических лучей. *Геомагнетизм и аэрономия.* 1964. Т. 4, № 6. С. 977–985.

Крымский Г.Ф., Кузьмин А.И., Козлов В.И. и др. Явления в космических лучах в августе 1972 г. *Изв. АН СССР. Сер. физ.* 1973. Т. 37. С. 1205–1210.

Крымский Г.Ф., Кузьмин А.И., Кривошапкин П.А. и др. Космические лучи и солнечный ветер. Новосибирск: Наука, 1981. 224 с.

Отнес Р., Эноксон Л. Прикладной анализ временных рядов. Основные методы. М.: Мир, 1982. 430 с.

Тейлор Дж. Введение в теорию ошибок. М.: Мир, 1985. 272 с.

Balabin Yu.V., Gvozdevsky B.B., Vashenyuk E.V., Dzhappuev D.D. EAS hadronic component as registered by a neutron monitor. *Astrophys. Space Sci. Trans.* 2011. Vol. 7. P. 507–510. DOI: [10.5194/astra-7-507-2011](https://doi.org/10.5194/astra-7-507-2011).

Owens A.J. Cosmic-ray scintillations .2. General Theory of Interplanetary Scintillations. *J. Geophys. Res.* 1974. Vol. 79. P. 895–906.

Russell C.T. Comments on the measurement of power spectra of the interplanetary magnetic field / in Solar Wind, NASA-SP-308, Wash., D.C.: NASA. 1972. P. 365–374.

URL: https://cdaweb.gsfc.nasa.gov/cdaweb/sp_phys (дата обращения 8 февраля 2022 г.).

URL: http://www.srl.caltech.edu/ACE/ASC/level2/lvl2/DATA_MAG.html (дата обращения 8 февраля 2022 г.).

URL: <https://cosmicrays oulu.fi> (дата обращения 8 февраля 2022 г.).

URL: <http://pgia.ru/cosmicray> (дата обращения 8 февраля 2022 г.).

Статья подготовлена по материалам Семнадцатой ежегодной конференции «Физика плазмы в Солнечной системе», 7–11 февраля 2022 г., ИКИ РАН, Москва.

Как цитировать эту статью:

Стародубцев С.А. О форме спектра флуктуаций интенсивности галактических космических лучей. *Солнечно-земная физика.* 2022. Т. 8, № 2. С. 78–83. DOI: [10.12737/szf-82202211](https://doi.org/10.12737/szf-82202211).